

Interpolazione diretta di dati sperimentali di crescita di cricca a fatica

Original

Interpolazione diretta di dati sperimentali di crescita di cricca a fatica / Matteis, Paolo; Firrao, D.. - (2009).

Availability:

This version is available at: 11583/2262312 since:

Publisher:

Published

DOI:

Terms of use:

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

INTERPOLAZIONE DIRETTA DI DATI SPERIMENTALI DI CRESCITA DI CRICCA A FATICA

P. Matteis, D. Firrao

DISMIC,



POLITECNICO DI TORINO



Metodo usuale di riduzione dei dati sperimentali

esperimento di
Crescita di Cricca a Fatica (CCF)

punti sperimentali $N^{(i)} - a_{sper}^{(i)}$

Passo 1 (P1): metodo secante, met. polinomiale

curva $\log(\Delta K_{P1}^{(i)}) - \log\left(\frac{da}{dN}_{P1}^{(i)}\right)$

Passo 2: interpolazione della curva $\Delta K - da/dN$

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, \{\theta\}) , \text{ p.e.: } f(\Delta K, \{C, m\}) = C \cdot \Delta K^m$$

$$\log\left(\frac{da}{dN}_{calc}^{(i)}\right) = \log(C) + m \cdot \log(\Delta K_{P1}^{(i)})$$

$$Residuo = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\log\left(\frac{da}{dN}_{calc}^{(i)}\right) - \log\left(\frac{da}{dN}_{P1}^{(i)}\right) \right)^2}$$

legge di CCF

$\{\theta\}$ o $\{C, m\}$

Verifiche di vita residua a fatica

Metodo proposto

esperimento **normale** di CCF



punti sperimentali $N^{(i)} - a_{sper}^{(i)}$

Passo unico:
interpolazione (non lineare) della curva $a - N$:

$$a_{calc}^{(i)} = a_0 + \int_0^{N^{(i)}} \frac{da}{dN} dN = a_0 + \int_0^{N^{(i)}} f(\Delta K, \{\theta\}) dN$$

$$Residuo = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (a_{calc}^{(i)} - a_{sper}^{(i)})^2}$$

Obiettivo: maggiore precisione, confronto tra leggi di CCF



legge di CCF



$\{\theta\}$

Verifiche di vita residua a fatica

Sommario

- Materiali e metodi sperimentali
- Dati sperimentali
- Modelli matematici
- Sequenze e metodi di calcolo e confronto
- Risultati
- Conclusioni

Materiali e metodi sperimentali

acciai	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	Nb	V	B	Zr	S	P
2738	0.42	1.5	2.0	1.1	0.21	0.37	-	0.08	-	-	0.002	0.006
2002	0.28	1.6	1.4	1.1	0.60	0.28	0.020	0.12	0.0013	0.03*	<0.001	0.007

Blumi bonificati di dimensione 2970x1285x1190 mm³ (2738) e 2900x1020x1260 mm³ (2002)

acc.	Condizione metallurgica	R _{p02}	K _{Ic}	intervalli interpolati		metodi sper.
-	-	MPa	MPa√m	MPa√m	n	-
2738	Perlite (850 °C / 600 °C / aria)	665*	n.d.	18-51	145	Provette SENB (B 12,5 - W 25 mm); misure di cedevolezza; R=0,1
	Bain. + Mart. (850 °C / 340 °C / aria)	1440*	n.d.	20-33	74	
	Mart. Rinv. (850 °C / aria / 590 °C)	1051*	80*	17-72	191	
	come fabbr., prof. 645 mm	665	47	11-44	190	
	come fabbr., prof. 310 mm	813	41	15-6 9-32	61 66	Provette CT (B 6 - W 50 mm); misure ottiche; R=0,1
	come fabbr., prof. 60 mm	910	34	11-41	35	
2002	come fabbr., prof. 460 mm	996	44	13-6 ... 16-36 [†]	17 ... 27	
	come fabbr., prof. 260 mm	969	44	7-6 7-29	8 74	
	come fabbr., prof. 80 mm	964	54	7-10 11-35	18 30	

*Stime †5 intervalli

Dati sperimentali

$$\{\underline{N}\} = \{\underline{N}_0 \dots \underline{N}_i \dots\} = \{0 \ 10000 \ 20000 \dots\}$$

numeri di cicli compiuti da inizio prova

$$\{\underline{a}\} = \{\underline{a}_0 \dots \underline{a}_i \dots\} = \{12,16 \ 12,35 \ 12,57 \dots [\text{mm}] \}$$

lunghezze di cricca misurate dopo \underline{N}_i cicli

$$\{\underline{\Delta P}\} = \{\underline{\Delta P}_0 \dots \underline{\Delta P}_i \dots\} = \{4,43 \ 4,43 \ 4,00 \dots [\text{kN}] \}$$

ampiezza di forza applicata tra N_i+1 ed N_{i+1} cicli
(perlopiù costante nelle prove a ΔK crescente)

Modelli matematici

Fattori di Intensificazione delle Tensioni

$\Delta K = \Delta P \cdot F_G \cdot h\left(\frac{a}{W}\right)$	F_G	$h(\alpha)$
CT	$\frac{1}{BW^{1/2}}$	$\frac{(2+\alpha) \cdot (0,886 + 4,64 \cdot \alpha - 13,32 \cdot \alpha^2 + 14,72 \cdot \alpha^3 - 5,6 \cdot \alpha^4)}{(1-\alpha)^{3/2}}$
SENB	$\frac{S}{BW^{3/2}}$	$\frac{3 \cdot \alpha^{0,5} \cdot (1,99 - \alpha \cdot (1-\alpha) \cdot (2,15 - 3,93 \cdot \alpha + 2,7 \cdot \alpha^2))}{(2 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha) \cdot ((1-\alpha)^{1,5}))}$

Leggi di Crescita di Cricca a Fatica

$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, \{\theta\})$	$f(\Delta K, \{\theta\})$	$\{\theta\}$
Paris	$C \cdot \Delta K^m$	$\{C, m\}$
Forman $\left\{ \begin{array}{l} \Delta K \text{ cresc.} \\ \Delta K \text{ decr.} \end{array} \right.$	$\frac{C \cdot \Delta K^m}{1 - \Delta K / ((1-R) \cdot K_c)}$	$\{C, m, K_c\}$
- Mettu	$C \cdot (\Delta K - \Delta K_{th})^m$	$\{C, m, \Delta K_{th}\}$

Sequenza di calcolo

A due passi

- ★ **passo 1**: calcolo dei punti $\log(\Delta K_{P1}^{(i)}) - \log((da/dN)_{P1}^{(i)})$
 - met. della **secante**, met. **polinomiale** di ordine 2 (solo ΔK crescente)
- ★ **passo 2***: interpolazione dei punti $\log(\Delta K_{P1}^{(i)}) - \log((da/dN)_{P1}^{(i)})$
 - **[1]** Paris, interp. **lineare**
 - **[2]*** Paris, interp. **non lineare**, 1° stima: $\{\theta\}_{[1]}$
 - **[3]*** Forman-Mettu, interp. non lin., 1° stima: $\{C_{[1]}, m_{[1]}, K_C=80 \text{ o } \Delta K_{th}=5\}$

A passo singolo: interpolazione non lineare dei punti $N^{(i)} - a^{(i)}$

- **[4]** Paris, 1° stima: $\{\theta\}_{[2]}$
- **[5]** Forman-Mettu, 1° stima: $\{\theta\}_{[3]}$

* punti interpolandi calcolati con il metodo della secante (ripetuto per quelli calcolati con il metodo polinomiale, dove applicabile)

Metodi di Calcolo per le interpolazione a passo singolo

Simulazione della crescita di cricca a fatica

- dati: a_0 , legge di CCF, $\{\theta\}$, $\Delta P^{(i)}$, $N^{(i)}$
- integrazione con passo $da = 0,0001 W \rightarrow$ curva a - N
- interpolazione della curva a - N in $N^{(i)} \rightarrow a_{calc}^{(i)}$

Metodo dei minimi quadrati:

- incognite: a_0 , $\{\theta\}$
 - minimizzazione del residuo quadratico medio tra $a_{calc}^{(i)}$ e $a_{sper}^{(i)}$
 - algoritmo di minimizzazione di Nelder – Mead
- $\rightarrow a_0, \{\theta\}$
- \rightarrow residuo quadratico medio, coefficiente di determinazione R^2

Uso di a_0 come incognita accessoria:

- altrimenti $a^{(0)}$ influisce più di ogni altra $a^{(i)}$

Confronti tra metodi a due passi ed a passo singolo

Per equità di confronto, per ciascun metodo a due passi $[x=1,2,3]$ si calcola anche il valore di $a_{0[x]}$ che minimizza il residuo quadratico medio tra $a_{sper}^{(i)}$ ed $a^{(i)}$ calcolato con $\{\theta\}_{[x]}$

Per ogni sequenza di dati sperimentali, sono stati confrontati:

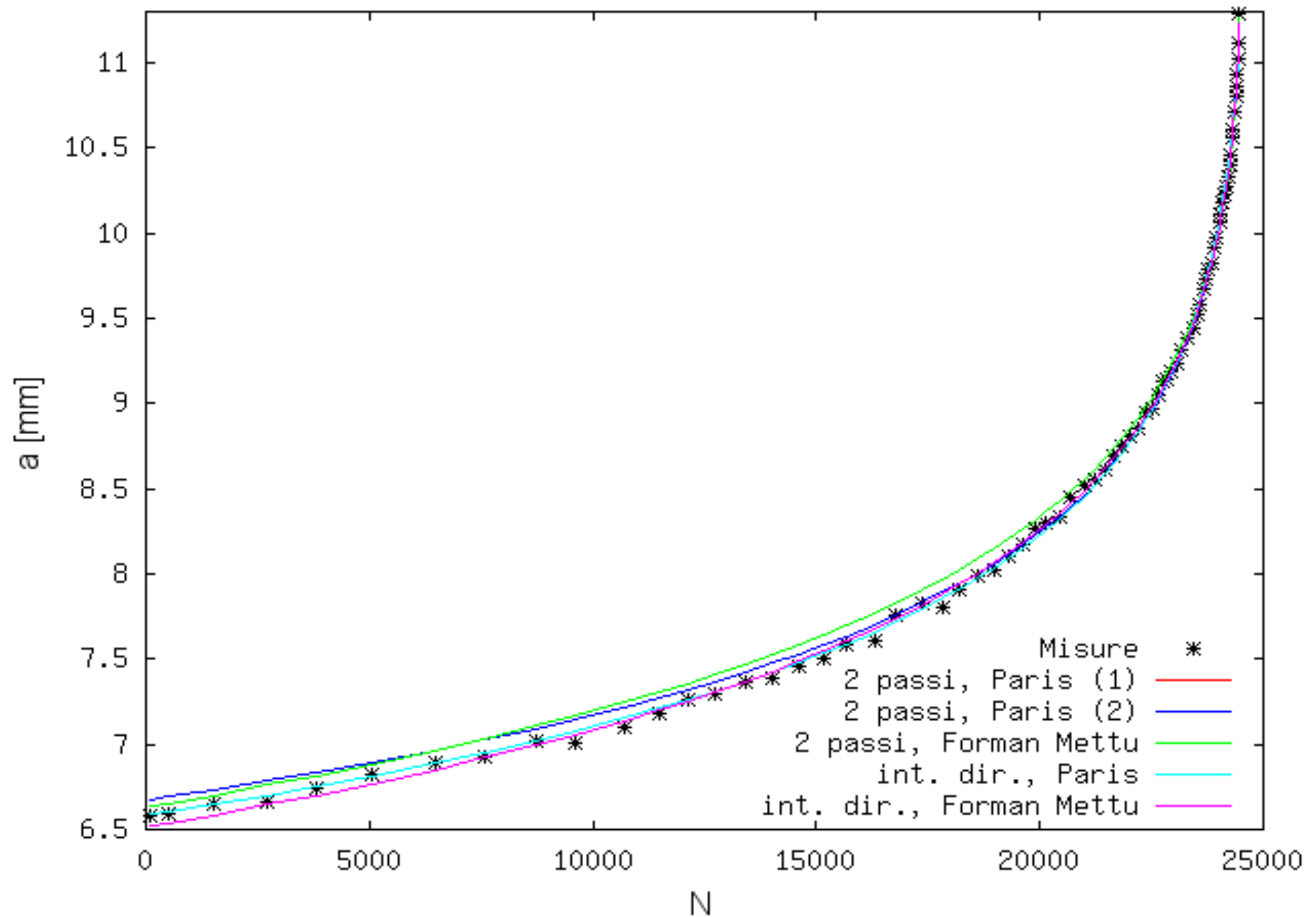
★ *residuo*

★ R^2

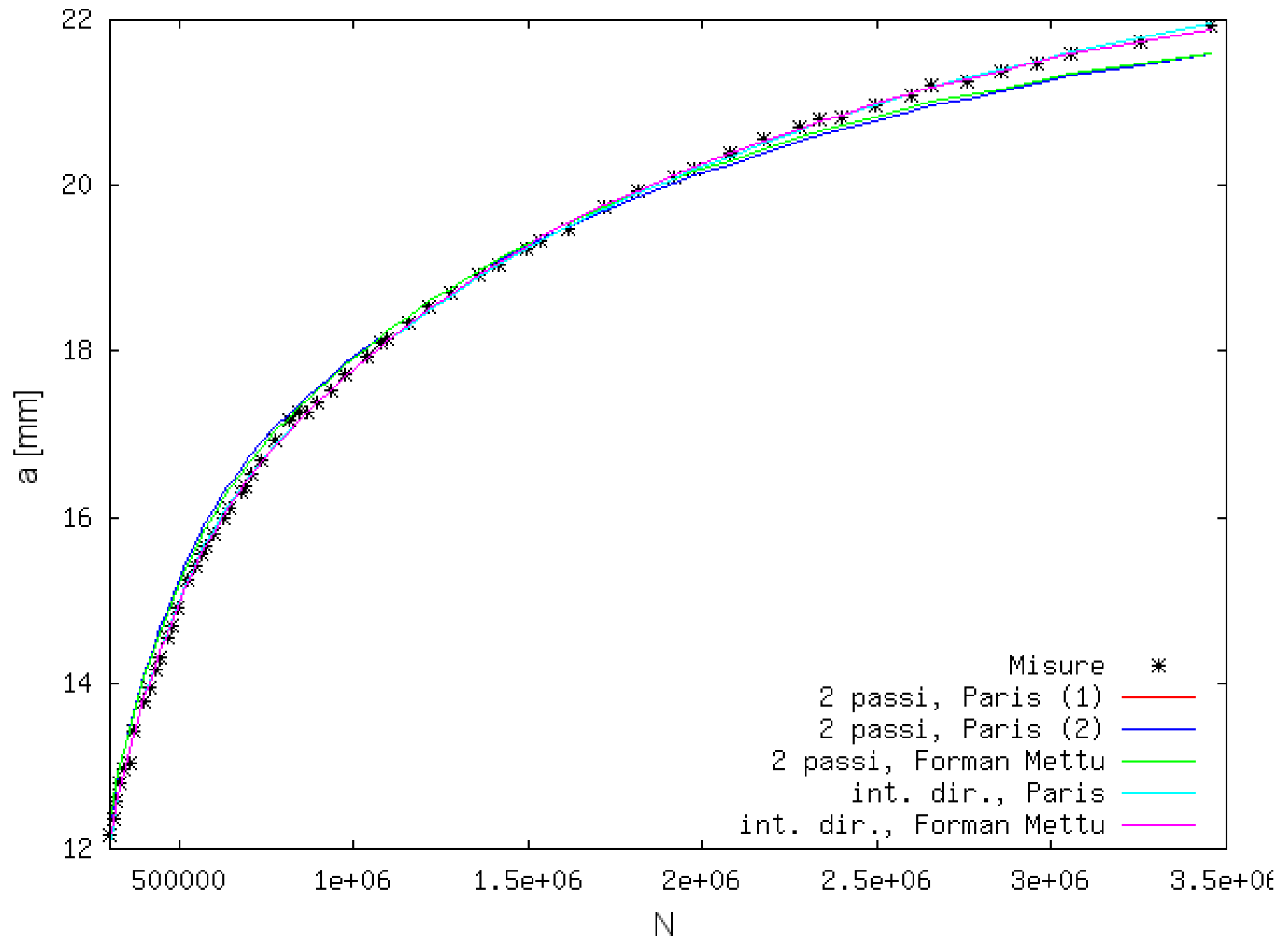
★ *grafico* $a - N$ (punti sperimentali e curva interpolante)

calcolati usando ciascun metodo $[x]$ (cioè con $\{\theta\}_{[x]}$ e $a_{0[x]}$ e la legge di CCF)

Risultati: campione 2738 - BM, ΔK : 20-33 MPa \sqrt{m}



Risultati: campione 2738 - 310, ΔK : 15-6 MPa \sqrt{m}



Risultati: parametro *m*

campioni provati		K_{Ic}	intervalli di prova esaminati		Paris 2P sec	Paris 2P pol	Forman-Mettu 2P sec	Forman-Mettu 2P Pol	Paris 1P	Forman-Mettu 1P
		MPa√m	MPa√m	n	[1]	[2p]	[3]	[3p]	[4]	[5]
2738	P	n.d.	18-51	145	3.45	3.45	3.45	3.45	3.42	3.42
	BM	n.d.	20-33	74	9.88	9.65	6.75	6.99	9.42	6.8
	MR	80*	17-72	191	2.9	2.75	2.31	2.06	2.74	2.69
	645	47	11-44	190	2.97	2.99	2.97	2.99	2.99	2.99
	310	41	15-6	61	3.78		2.85		3.65	2.83
			9-32	66	3.08	3.16	3.08	3.16	3.05	3.05
	60	34	11-41	35	2.35	2.44	2.35	2.44	2.26	2.26
2002	460	44	13-6	17	4.77		2.21		4.49	1.81
			9-7	7	5.56		12.4		6.52	14.3
			8-9	20	7.03	5.73	7.03	2.17	5.94	5.94
			9-15	31	3.12	2.88	3.12	2.88	2.8	2.8
			16-36	27	4.11	4.64	4.11	4.64	4.47	4.47
	260	44	7-6	8	4.66		0.04		1.75	0.05
			7-29	74	4.63	4.5	4.63	4.5	4.38	4.20
	80	54	7-10	18	5.26	6.74	3.31	6.74	5.66	5.2
			11-35	30	3.65	3.93	3.65	3.93	3.45	3.45

Risultati: R^2

campioni provati		K_{Ic}	intervalli di prova esaminati		Paris 2P sec	Paris 2P pol	Forman- Metu 2P sec	Forman- Metu 2P Pol	Paris 1P	Forman- Metu 1P
		MPa√m	MPa√m	n	[1]	[2p]	[3]	[3p]	[4]	[5]
2738	P	n.d.	18-51	145	0.94	0.97	0.94	0.97	0.98	0.98
	BM	n.d.	20-33	74	0.96	0.97	0.95	0.98	0.97	0.98
	MR	80*	17-72	191	0.96	0.97	0.95	0.97	0.98	0.98
	645	47	11-44	190	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99
	310	41	15-6	61	0.92		0.93		0.98	0.99
			9-32	66	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
	60	34	11-41	35	0.97	0.96	0.97	0.96	0.97	0.97
2002	460	44	13-6	17	0.86		0.89		0.93	0.96
			9-7	7	0.93		0.93		0.95	0.95
			8-9	20	0.95	0.96	0.95	0.96	0.96	0.96
			9-15	31	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
			16-36	27	0.92	0.96	0.92	0.96	0.96	0.96
	260	44	7-6	8	0.92		0.79		0.95	0.96
			7-29	74	0.95	0.96	0.95	0.96	0.96	0.83
	80	54	7-10	18	0.94	0.93	0.93	0.93	0.96	0.96
			11-35	30	0.94	0.9	0.94	0.9	0.95	0.95

Risultati: Residuo [mm]

campioni provati		K_{Ic}	intervalli di prova esaminati		Paris 2P sec	Paris 2P pol	Forman-Mettu 2P sec	Forman-Mettu 2P Pol	Paris 1P	Forman-Mettu 1P
		MPa√m	MPa√m	n	[1]	[2p]	[3]	[3p]	[4]	[5]
2738	P	n.d.	18-51	145	0.14	0.08	0.14	0.08	0.06	0.06
	BM	n.d.	20-33	74	0.05	0.04	0.07	0.03	0.04	0.03
	MR	80*	17-72	191	0.13	0.09	0.18	0.11	0.07	0.07
	645	47	11-44	190	0.06	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03
	310	41	15-6	61	0.22		0.19		0.05	0.04
			9-32	66	0.09	0.12	0.09	0.12	0.09	0.09
2002	60	34	11-41	35	0.16	0.22	0.16	0.22	0.13	0.13
	460	44	13-6	17	0.08		0.06		0.05	0.02
			9-7	7	0.03		0.03		0.02	0.02
			8-9	20	0.06	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04
			9-15	31	0.06	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04
			16-36	27	0.19	0.11	0.19	0.11	0.09	0.09
	260	44	7-6	8	0.01		0.04		0.01	0.01
			7-29	74	0.37	0.27	0.37	0.27	0.25	1.13
	80	54	7-10	18	0.12	0.14	0.13	0.14	0.08	0.08
			11-35	30	0.24	0.44	0.24	0.44	0.21	0.21

Risultati: ΔK_{th} o K_c [MPa \sqrt{m}]

campioni provati		K_{Ic}	intervalli di prova esaminati		Forman- Metu 2P sec	Forman- Metu 2P Pol	Forman- Metu 1P
		MPa \sqrt{m}	MPa \sqrt{m}	n	[3]	[3p]	[5]
2738	P	n.d.	18-51	145	6.E+13	3.E+14	6.E+14
	BM	n.d.	20-33	74	38.8	39.9	39.9
	MR	80*	17-72	191	112.6	102.6	847.7
	645	47	11-44	190	3.E+13	5.E+13	4.E+13
	310	41	15-6	61	2.3		2.2
			9-32	66	7.E+13	1.E+13	4.E+17
	60	34	11-41	35	6.E+14	3.E+14	5.E+14
2002	460	44	13-6	17	4.3		4.7
			9-7	7	-9.5		-10.2
			8-9	20	5.E+10	11.9	1.E+13
			9-15	31	1.E+12	1.E+11	1.E+13
			16-36	27	6.E+13	6.E+12	2.E+18
	260	44	7-6	8	6.2		6.2
			7-29	74	3.E+13	2.E+13	38.21
	80	54	7-10	18	14.2	1.E+11	32.7
			11-35	30	6.E+13	1.E+14	2.E+14

Conclusioni

- In generale, il metodo di interpolazione diretta qui proposto permette di interpolare i dati sperimentali (curve $N - a$) in modo lievemente più preciso (minori residui e maggiori coefficienti R^2) rispetto ai metodi di interpolazione usati a due passi;
- in particolare, il metodo proposto è relativamente più vantaggioso nelle prove a ΔK decrescente, forse a causa della maggior dispersione dei punti $\Delta K - da/dN$ che si verifica alle basse velocità di CCF;
- nei casi esaminati, l'uso delle leggi di CCF di Forman-Mettu perlopiù non è stato vantaggioso, rispetto all'uso della legge di Paris (residui e coefficienti R^2 peggiori o solo poco migliori, pur con 1 parametro in più; difficoltà di convergenza; valori di K_c spesso ininfluenti; valori di K_c o di ΔK_{th} talvolta fisicamente inaccettabili);
- Metodi simili potrebbero essere applicati ad esperimenti di CCF con effetti di storia dei carichi (p.e. ritardi dopo sovraccarichi isolati).